

混凝土强度回弹法检测结果受表面碳化影响的分析

熊书亮

湖北楚天卓越工程技术有限公司 湖北 宜昌 443000

【摘要】：回弹法作为混凝土结构强度现场检测的主流无损检测技术，混凝土表面碳化会提升表层硬度，导致回弹值虚高、强度推定结果失真，直接影响结构安全评定。本文聚焦降低碳化干扰，通过碳化深度精准测定与流程优化、碳化影响下的检测结果修正模型、表面碳化层处理及多方法协同验证三方面构建系统措施，有效减小检测误差，保障回弹法检测的真实性与可靠性，为工程现场混凝土强度检测提供实用技术支撑。

【关键词】：混凝土强度；回弹法；表面碳化

DOI:10.12417/2811-0722.26.06.067

引言

回弹法凭操作简便、无损高效的特质，在混凝土结构工程质量检测中获得广泛应用。环境二氧化碳长期渗透致使混凝土表面发生碳化，表层物理力学性能随之改变，扰乱回弹值与混凝土强度的固有关联，导致检测结果偏离真实水平。立足现场实操需求，本文深挖碳化干扰检测结果的作用机理，构建针对性优化方案，提升回弹检测精度与工程适配能力。

1 混凝土回弹法检测与表面碳化基础理论

回弹法检测混凝土的核心逻辑围绕回弹仪弹击杆冲击混凝土表面展开，弹性形变产生的回弹值映射表面硬度，进而建立与内部抗压强度的量化关联，检测精度更多依赖表面层物理力学特性，而非内部骨料或胶凝材料单独作用^[1]。混凝土表面碳化源于水泥水化产物氢氧化钙与环境二氧化碳的化学反应，生成致密碳酸钙晶体，这一过程降低碳化层孔隙率、提高表面硬度，碳化深度随环境温湿度、二氧化碳浓度及混凝土水胶比等因素梯度变化，从表层向内部逐步渗透。碳化引发的表面层物理力学特性改变，直接干扰回弹仪弹击能量传递效率与回弹值精准采集，成为回弹法检测结果偏差的核心诱因，也是后续分析碳化影响机制与优化检测措施的理论基础。

2 表面碳化对混凝土回弹法检测结果的影响机制

2.1 碳化层硬度变化对回弹值的干扰机制

混凝土碳化的核心作用是改变表层材料密度与硬度，这一变化直接冲击回弹法检测核心原理——回弹法通过弹击杆瞬时冲击混凝土表面采集回弹值映射表面硬度，推算结构强度的检测精度，建立在混凝土表层与内部力学性能相近的前提下。未碳化混凝土表层孔隙率高，水泥水化产物分布均匀，弹击冲击能量可均匀传递至内部基体，回弹值能真实反映混凝土整体强度特征。碳化过程中水泥水化生成的氢氧化钙与二氧化碳发生反应，生成的碳酸钙晶体持续填充表层孔隙，让表层微观结构从疏松多孔转变为致密均质，表层硬度提升，形成与内部基体截然不同的力学性能梯度^[2]。

碳化时间延长会逐步加剧这种梯度差异，低强度等级混凝土

胶凝材料占比相对较低，表层致密化速度更快，硬度提升幅度常高于高强度等级混凝土，检测偏差也更明显。现场实操可直观验证，同一混凝土构件未处理碳化层时回弹值普遍偏高，采用砂轮打磨完全剔除表层碳化层后回弹值明显回落，两者差值直接体现硬度变化带来的干扰，且差值大小与构件所处环境温湿度、二氧化碳浓度存在关联。碳化层硬度越高，弹击冲击时表层弹性变形越充分，回弹仪采集的回弹值越偏离真实值，此时回弹值仅代表碳化薄层硬度，无法反映内部混凝土实际抗压强度。即便碳化深度较浅的构件，表层硬度突变也会改变弹击能量传递路径，导致回弹值出现局部异常波动。这种干扰具有直接性与不可逆性，常规表面清洁、轻微打磨难以消除硬度梯度带来的检测偏差，是回弹值失真最直接核心的诱因，也是现场检测无法规避的基础干扰因素，工业建筑、老旧构筑物等长期暴露于复杂环境的场景中，该问题对检测结果可靠性的影响更为突出。

2.2 碳化深度与检测强度误差的量化相关性

碳化深度是量化碳化影响程度的关键指标，也是建立回弹检测误差判定标准的核心参数，现场检测采用酚酞试剂滴定法测定碳化深度，操作严格遵循《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T23-2011，试剂与混凝土内部碱性物质发生显色反应，精准划分碳化层与未碳化基体的界限，构成衔接碳化深度与误差分析的基础实操环节。碳化深度与检测强度误差的量化对应关系，依托全国混凝土结构无损检测实测数据库，经大量工程现场芯样实测强度与回弹推定强度的比对试验验证，可构建直观误差变化曲线，为检测结果判定提供权威数据支撑。参照 JGJ/T23-2011 规程及工程实测统计数据，碳化深度 0 至 2 毫米的轻微碳化阶段，混凝土表层致密化程度较低，硬度提升有限，表层与内部基体性能差异较小，回弹推定强度与芯样真实强度误差可控制在 5% 以内，对检测结果判定影响微弱。碳化深度达到 2 至 5 毫米的中度碳化阶段，碳酸钙晶体填充作用持续强化，表层硬度与内部基体差值逐步扩大，回弹值虚高现象开始凸显，检测误差呈线性上升趋势，误差值可达 8% 至 15%，此时缺乏深度修正极易导致强度判定失误。

碳化深度超过5毫米的重度碳化状态下，碳化层厚度完全覆盖弹击冲击作用区域，回弹值受碳化层性能主导，检测误差大幅攀升至20%以上，回弹推定强度与真实强度的偏差直接影响结构安全性判定，该数据结论与《混凝土结构现场检测技术标准》GB/T50784-2013中的实测分析结果吻合。大量工程实测数据统计可建立量化修正模型，以混凝土芯样抗压强度为真值，明确不同碳化深度对应的回弹强度修正系数，不同强度等级混凝土的碳化深度与误差量化关系虽存在细微差异，但整体变化趋势高度一致，这种量化相关性直接源于JGJ/T23-2011规程规定及住建部工程质量检测行业实测数据，成为后续检测结果修正、误差控制的直接依据，也是现场检测人员判定碳化干扰程度的实操标准^[3]。

2.3 碳化程度及环境因素对强度评估的联合影响

碳化程度与环境因素的耦合作用会共同加剧回弹法强度评估偏差，环境条件直接决定碳化速率、碳化层形态与密实度，放大硬度变异与深度差异带来的检测干扰，两者联合使检测偏差呈现非线性变化特征，成为现场检测中易被忽视的关键环节。环境温湿度主导碳化进程，室外露天环境的混凝土构件长期处于温湿度交替状态，二氧化碳渗透效率高，碳化反应持续稳定推进，碳化程度随使用年限逐步加深，回弹检测偏差逐年累积，老旧建筑构件的碳化干扰更为明显。室内干燥通风的工业建筑环境中，二氧化碳浓度高于普通民用建筑且空气流通性强，碳化速率远快于常规环境，相同使用年限下碳化深度更大、表层致密化程度更高，对回弹检测的干扰更为突出。

长期处于潮湿环境的混凝土构件，水分填充表层孔隙阻碍二氧化碳向内渗透，碳化速率明显放缓，碳化层较为疏松，虽表层硬度提升有限，但表层密实度分布不均导致弹击能量传递不稳定，同样造成回弹值无序波动，影响检测结果稳定性。不同碳化程度与差异化环境叠加后，强度评估偏差不再遵循单一深度变化规律，轻微碳化构件在高温、高二氧化碳浓度环境下可能出现远超预期的检测误差，中度碳化构件在潮湿、封闭环境中偏差反而相对可控。现场实操需结合构件所处环境类型、使用年限、养护条件同步判定碳化程度，综合分析联合作用下的检测偏差，单一考量碳化深度或表层硬度无法全面反映真实干扰程度，也难以实现检测结果精准修正，这一联合影响机制是提升回弹法检测精度的关键研究要点，也是工程现场优化检测流程、完善判定标准的重要依据。

3 减小表面碳化对回弹法检测影响的优化措施

为减小表面碳化对回弹法检测的干扰，需从检测操作、数据修正、现场处理与多方法验证层面形成系统化管控思路，为清晰展现全流程实施路径，具体优化流程如图1所示。

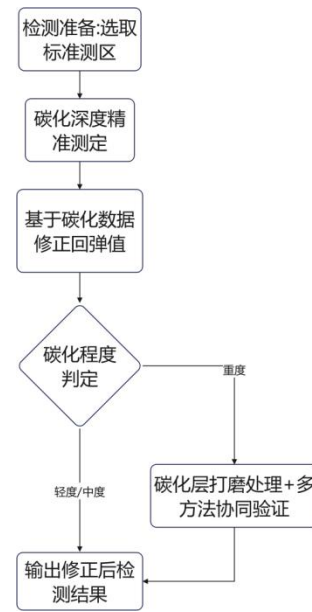


图1 混凝土回弹检测碳化干扰控制优化流程图

3.1 碳化深度精准测定与操作流程优化

碳化深度测定的精准度是消除碳化干扰的前提，获取真实有效的碳化深度数据才能为后续结果修正与工艺处理提供可靠依据，需严格遵循规范要求对测定全流程进行标准化优化，杜绝人为操作与环境因素引发的测定误差。现场碳化深度测定需依照回弹法检测混凝土抗压强度技术规程，在构件回弹测区内均匀选取具代表性的测点，避开蜂窝麻面、裂缝、修补等处特殊部位，每个测区选取不少于三个测点实施钻孔测定，确保数据反映构件整体碳化水平。

钻孔操作采用专用碳化深度测定钻具，控制钻孔直径与深度，钻孔深度需超出预估碳化深度两毫米以上，保证清晰区分碳化层与未碳化基体，钻孔完成后用洁净毛刷彻底清除孔内粉尘与碎屑，清理时避免清水冲洗，防止水分改变混凝土内部酸碱环境干扰酚酞显色效果^[4]。滴定操作选用浓度符合规范的酚酞酒精溶液，将试剂均匀滴注于钻孔内壁与底部，静置片刻后观察显色边界，未碳化混凝土遇试剂呈紫红色，碳化区域无颜色变化，两者界限即为碳化判定界面。读数采用精度达标的游标卡尺，垂直于混凝土表面测量显色界限至表层的垂直距离，读数精确至0.5毫米，同一测点多次读数取平均值，单个测区内所有测点的碳化深度数据剔除异常值后计算算术平均值，作为该测区最终碳化深度值。针对潮湿环境、老旧构件等特殊场景优化操作细节，潮湿构件需提前自然干燥再测定，避免水分稀释试剂影响显色，长期外露构件需避开表面风化层单独选取测点，通过全流程细节把控与标准化操作，从源头提升碳化深度测定精度，为后续检测优化筑牢基础。

3.2 基于碳化影响的回弹检测结果修正模型

构建科学适用的碳化影响修正模型，是回弹检测数据校

准、消除强度虚高误差的核心抓手，需依托国家规范标准与工程实测数据，搭建适配不同碳化程度、混凝土强度等级的修正体系，实现检测数据的精准量化校正。现行回弹法检测技术规程已明确碳化深度对应的强度修正系数，该系数基于全国海量混凝土构件实测数据统计，是现场通用修正依据，检测人员需依据实测碳化深度直接调取对应系数，对原始回弹值开展初步修正，消除常规碳化带来的基础偏差。针对工程中特殊强度等级、特殊使用环境的混凝土构件，可构建本地化修正模型，通过钻芯法获取构件真实抗压强度，以芯样强度为基准，对比对应测区未修正回弹强度与实测碳化深度，借助线性回归分析拟合本地化修正公式，让修正结果更贴合区域混凝土材料特性与施工工艺。

修正模型的运用需严格区分碳化深度区间，轻微碳化阶段采用规范基础修正系数即可保障精度，中度碳化需结合本地化数据微调修正系数，重度碳化则应采用多级修正模式，综合统筹碳化深度、表层硬度、构件使用年限等参数，规避单一系数修正引发的误差。修正完成后需开展数据合理性验证，比对同一测区修正前后的强度变化幅度，排查异常数据，确保修正后的回弹强度与混凝土实际受力性能匹配。该修正模型以实测数据为支撑、规范标准为框架，摒弃理想化理论计算，直接应用于现场检测数据处理，有效降低碳化引发的强度评估误差，让回弹检测结果更具工程实践参考价值。

3.3 表面碳化层处理与多方法协同补偿方案

混凝土构件碳化程度较深时，单纯数据修正难以消除干扰，需通过现场碳化层处理工艺与多检测方法协同验证实现碳

化干扰的彻底补偿，形成操作处理与数据验证的双重保障体系。表面碳化层处理采用机械打磨方式，角磨机搭配金刚石磨片对回弹测区表面均匀打磨，打磨深度超出实测碳化深度 0.5 至 1 毫米，完全剔除硬度异常的碳化层，露出内部未碳化混凝土基体，打磨过程中控制力度保证表面平整无划痕、无松动碎屑，不破坏混凝土内部结构，打磨完成后毛刷清理表面粉尘再进行回弹检测，此时检测结果直接反映混凝土真实强度，无需额外碳化深度修正。老旧建筑、重度碳化且无法大面积打磨的构件，采用多方法协同检测方案，以回弹法为基础结合超声回弹综合法互补检测，利用超声波传播速度不受表面碳化层硬度影响的特性，与回弹值形成双参数判定，降低单一方法检测误差。重要结构构件或检测结果存在争议的部位，钻芯法进行最终验证，在回弹测区对应位置钻取混凝土芯样，标准化加工后开展抗压试验，芯样强度作为最终判定依据对回弹检测结果校准。建立检测结果闭环验证机制，对比分析碳化层处理前后的回弹数据、修正后数据、多方法检测数据，确认数据一致性，确保检测结果不受碳化干扰^[5]。

4 结语

混凝土表面碳化对回弹法检测结果的干扰普遍存在且影响突出，是制约检测精度的核心因素。本文搭建的碳化深度精准测定、数据修正模型应用、表面处理与多方法协同验证体系，贴合工程现场实际需求，具备较强实操价值。全流程优化可有效消除碳化引发的强度判定误差，规范回弹检测实施过程，对提升混凝土结构检测质量、保障结构安全与工程耐久性具有重要现实意义。

参考文献：

- [1] 孟林超.早龄期碳化对回弹法检测混凝土强度的影响[J].河南科技,2025,52(19):78-81.
- [2] 陈丽.大掺量粉煤灰混凝土回弹强度的影响机制及检测优化研究[J].广东建材,2026,42(2):63-66.
- [3] 黄高阳.回弹法检测铝模工艺成型混凝土构件强度的准确性及对策[J].江西建材,2025(8):136-138.
- [4] 井志彬,李波,常江,蒋坤,汪遵彪,王雨婷.基于 SVR 的回弹法预测混凝土强度[J].山西建筑,2025,51(19):37-41.
- [5] 刘笑天.碳化深度对回弹法检测混凝土抗压强度的影响[J].数码设计(电子版),2023(4):0817-0819.